

УДК 629.7.03.035.5

Турманидзе Р.С., д.т.н., проф.
Грузинский Технический Университет (ГТУ)

КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУШНЫХ ВИНТОВ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ В ДИНАМИКЕ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В АВИАЦИИ И ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Turmanidze R.
Georgian Technical University, Georgia (inform@gtu.ge)

SOME DESIGN OF ROTORS WITH VARIABLE GEOMETRY PARAMETERS IN DYNAMICS AND THEIR EFFECTIVE USE IN AVIATION AND WIND ENERGY

В результате изготовления и испытания демонстрационной модели винта с изменяемыми геометрическими параметрами (ВИГ), в динамике, нами было доказано, что, например, для авиации использование ВИГ дает возможность особенно эффективно оптимизировать полет самолетов вертикального взлета и посадки (СВВП), обеспечить максимальный диаметр и минимальную крутку в режиме висения и наоборот, минимальный диаметр и максимальную крутку при горизонтальном полете. В частности, при варьировании диаметра испытываемой модели ротора от 4,1 до 5,6 м и крутки лопастей в пределах $8^0 \div 30^0$ можно увеличить грузоподъемность летательного аппарата примерно в 1,6 раза, или увеличить скорость полета в 1,4 раза, или соответственно уменьшить расход топлива.

Для ветроэнергетических установок, особенно с большими мощностями, использование ВИГ-а даст возможность расширить диапазон максимальных значений КПД установки при изменении скорости ветра в большом диапазоне от 3 до $20 \div 22$ м/сек, а также обеспечить работоспособность установки при тех высоких скоростях ветра ($22 \div 35$ м/сек), при которых существующие установки не в состоянии работать. Решение этой проблемы стало особенно актуальным после известной катастрофы в Фукусиме, Японии. Эти события вынуждают руководителей всех ведущих стран мира изыскать возможности, чтобы максимально заменить долю атомной энергии другими видами в общем энергетическом балансе. На сегодняшний день, для этой цели более эффективного метода, чем ветроэнергетика по экономическим и экологическим критериям, а также потенциально возможным осваиваемым объемом энергий, к сожалению, не существует.

Проведенные предварительные аэродинамические и экономические расчеты доказывают, что с помощью использования разработанной нами конструкции можно увеличить годовой объем выработанной каждой ветростанцией энергии минимум на 100%-ов.

В представленной работе проанализированы разные варианты разработанных конструкций роторов с указанием их преимуществ и на основе результатов проведенных аэродинамических испытаний действующих моделей выданы рекомендации для эффективного использования каждого варианта в тех или иных конкретных отраслях техники.

Ключевые слова: Лопасть, угол установки, крутка лопастей, ветроэнергетика

Введение

Известно, что со дня существования воздушных винтов остро стоит проблема создания конструкции воздушных винтов с возможностью изменения их основных геометрических параметров в динамике. Это обусловлено тем, что винты фиксированного шага (ВФС) не являются оптимальными для всех этапов эксплуатации агрегатов разного назначения. Решение этой проблемы возможно только лишь применением винта изменяемой геометрии (ВИГ), благодаря возможности одновременного изменения диаметра винта, а также угла установки и крутки лопастей в динамике.

Например, для авиации использование ВИГ дает возможность особенно эффективной оптимизации полета самолетов вертикального взлета и посадки (СВВП), обеспечением максимального диаметра и минимальной крутки в режиме висения, и наоборот, минимального диаметра и максимальной крутки при горизонтальном полете.

Для ветроэнергетических установок, особенно с большими мощностями, использование ВИГ-а даст возможность расширить диапазон максимальных значений КПД установки при изменении скорости ветра в большом диапазоне от 3 до $20 \div 22$ м/сек, а также обеспечить работоспособность установки при тех высоких скоростях ветра ($22 \div 35$ м/сек), при которых существующие установки не в состоянии работать. Это проблема особенно актуальна стала после известной катастрофы в Фукусиме, Японии, в результате, которой все ведущие страны мира стараются максимально заменить долю атомной энергии другими видами в общем энергетическом балансе страны. На сегодняшний день, для этой цели более эффективного метода, чем ветроэнергетика по

экономическим и экологическим критериям, а также потенциально возможным осваиваемым объемом энергий, к сожалению, не существует.

Проведенные предварительные аэродинамические и экономические расчеты доказывают, что в результате использования таких конструкций можно увеличить годовой объем выработки каждой ветростанции минимум на 100%-ов.

Несмотря на множество работ известных фирм, и ученых разных стран, проблема ВИГ еще не решена. Существуют патенты, не нашедшие реального воплощения, главным образом из-за сложности и недостаточной надежности их технического решения.

Следует учесть, что все эти фирмы занимались изменением, какого - либо одного параметра, например, фирма «Сикорский» занималась изменением только диаметра винта, а корпорация «Боинг» - изменением только крутки лопастей.

Грузинский технический университет (ГТУ) предложил сочетание изменения диаметра и крутки во время полета.

По линии международного научно-технического центра (МНТЦ) группа специалистов ГТУ работала над проектом G-060-2 «Винт изменяемой геометрии (ВИГ) и средства его управления (узлы, приводящие в действие)».

Первоначально на этапе анализа, на основе расчленения объекта исследования был спроектирован и изготовлен макет винта с изменяемым диаметром, потом макет винта с изменяемой круткой лопастей. После лабораторных испытаний их основных узлов на этапе синтеза был создан винт с одновременно изменяемыми диаметром и круткой лопастей, а также стенд для его испытания [3].

Проведенные стендовые испытания модели ВИГ показали, что при высоких числах оборотов возникают значительные центробежные силы, действующие на ходовой винт. Ходовой винт – самый нагруженный элемент конструкции несущего винта и является слабым звеном. Снижение вредного воздействия этих сил стало весьма актуальной проблемой. Соответственно по линии МНТЦ группа специалистов ГТУ работала над проектом G-916 «Управляемый винт изменяемой геометрии с компенсацией действия центробежных сил». Коллабораторами были Жан Жакк Филипп старший научный сотрудник, почетный советник научного центра Франции «ОНЕРА», занимающейся исследованиями и разработками вертолетов и СВВП, а так же господин Лео Дадоне.

Целью проекта G-916 была разработка системы компенсации центробежных сил. Технический подход состоял в проведении модельного эксперимента, в котором стенд стационарно закреплен на месте. При вращении винта в режиме вентилятора были осуществлены измерения тяги в зависимости от изменения частоты вращения и диаметра винта. Это имитирует условия режима висения летательного аппарата. Из возможных принципов компенсации (механического, электрического, гидравлического) был выбран гидравлический, как наиболее гибкий в управлении [2, 4].

На конструкцию этого варианта ВИГ-а получен Европатент Application No/Patent No 08737551.5 - 2422 PCT/IB2008001041. В настоящее время патентуется в США. Все финансовые расходы патентования взял на себя Евросоюз.

Безопасность динамических испытаний ВИГ-а была обеспечена безотказностью узлов ВИГ с системой компенсации. Для оценки безотказности был сконструирован и изготовлен стенд статических испытаний, на котором были экспериментально имитированы нагрузки, действующие при различных частотах вращения винта. Были определены линии упругости лопасти в зависимости от имитируемых частот вращения при сдвинутой и раздвинутой лопасти, а также зависимости усилий на рычаге управления стендом от имитируемых частот вращения.

Эксперименты, на стенде динамических испытаний, были проведены методом замера скорости воздушного потока крыльчатым анемометром, который для данной задачи характеризовался достаточной повторяемостью результатов измерений.

Установлено, что в случае увеличения диаметра винта в 1,4 раза и изменения крутки лопасти в пределах $16 \div 18^\circ$ обеспечивается повышение силы тяги примерно, в 1,6 раз.

Эффективность системы компенсации доказана многократным безотказным сдвижением-раздвижением лопасти винта во всем диапазоне изменения частот вращения. Это обусловило синхронность функционирования ВИГ-а.

Результаты работ по обоим проектам доложены и одобрены на авторитетных международных научно-технических конференциях, запатентованы и опубликованы в научных статьях. В Грузии и Румынии издана монография на русском и английском языках.

Новые конструкции ротора и результаты их испытания

Коллабораторами проектов было предложено, что для дальнейшего увеличения эффективности использования ВИГ-а, особенно для маленьких самолетов, целесообразно упрощение механизма изменения диаметра и увеличение диапазона изменения крутки лопастей до $30 \div 35^\circ$.

Исполнителями проекта было предложено несколько конструктивных вариантов для решения этой задачи. МНТЦ на основании поддержки коллабораторов профинансировал это предложение.

Из предложенных конструктивных вариантов на основе консультации с коллабораторами, а также с другими компетентными специалистами работающих в области авиации, был выбран более оптимальный и в условиях Грузии наиболее реализуемый вариант. Сущность этого варианта заключается в том, что втулка и лопасти освобождены от всяких лишних деталей и узлов и остался только трос, концы которого закреплены на движущихся частях лопастей. Сама лопасть, с целью свободного осуществления крутки, состоит из гибких элементов, которые закреплены между нервюрами (Рис.1).

При увеличении оборотов воздушного винта, за счет возникших центробежных сил, движущиеся части лопастей раздвигаются, и диаметр винта увеличивается. Для уменьшения диаметра, поршень и шток гидроцилиндра перемещаются в нужном направлении и с помощью тросов диаметр винта уменьшается.

При увеличении или уменьшении диаметра с помощью специальных механизмов каждая нервюра, в каждый момент, занимает заранее рассчитанное угловое положение вокруг неподвижного лонжерона, чем обеспечивается максимальная крутка лопастей при минимальном диаметре и наоборот, минимальная крутка при максимальном диаметре винта. Этими же механизмами крутки сохраняется стабильность формы лопастей при вращении винта, т.е. при действии на лопасти значительных центробежных и подъемных сил.

На эту конструкцию получен Грузинский патент и готовятся документы для Европейского патента, на финансирование которого имеется согласие руководителей Евросоюза.

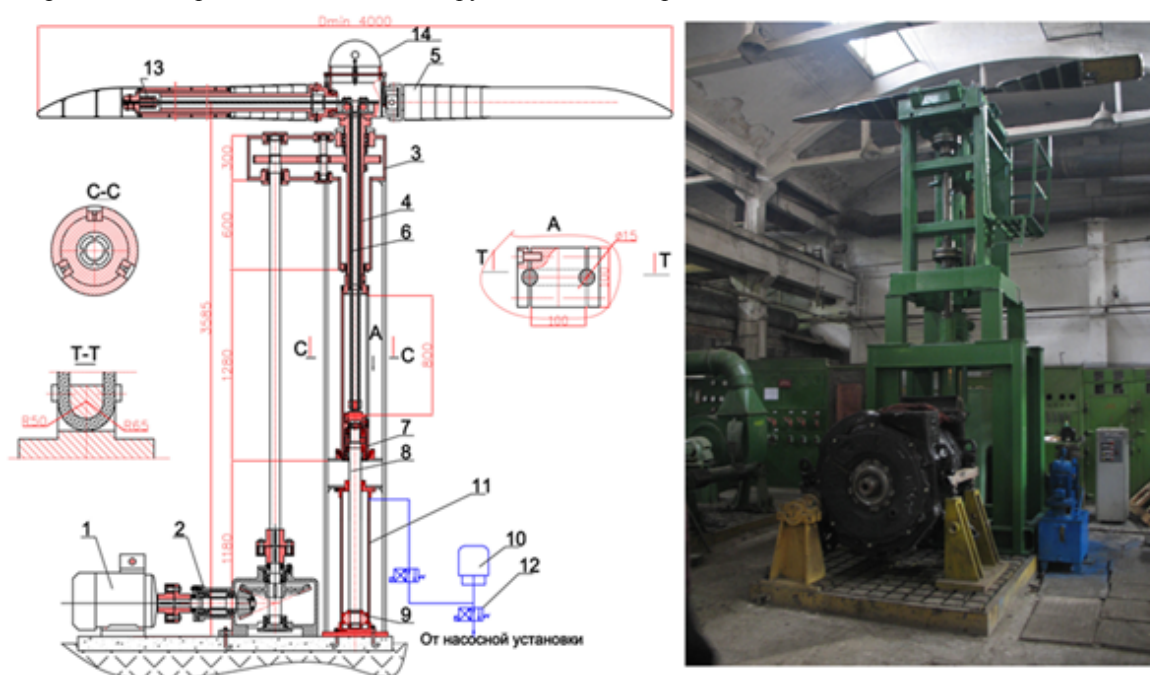


Рис. 1. Стенд динамических испытаний и фото стенда

1-Электродвигатель постоянного тока, 2-Конический редуктор, 3-Цилиндрический редуктор, 4-Шпиндель цилиндрического редуктора, 5-Лопасть с гибкими элементами, 6-Трос, 7-Узел подшипников с корпусом, 8-Шток, 9-Поршень, 10-Гидропневмоаккумулятор, 11-Гидроцилиндр, 12-Гидрораспределитель, 13-Узел крепления троса, 14- Втулка

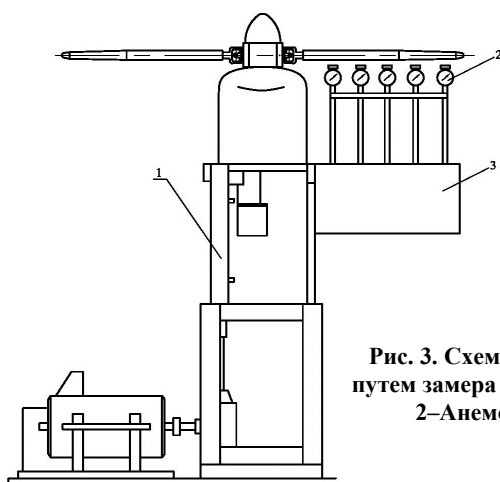
Проведен подробный анализ существующих литературных данных, осуществлены необходимые аэродинамические и прочностные расчеты, составлены технологические карты изготовления всех ответственных деталей, параллельно были изготовлены детали и узлы, осуществлена модернизация стендов для



Рис. 2. Лопасть с гибкими элементами и нервюры

статических и динамических исследований соответственно новой конструкции винта, проведены предварительные испытания лопастей на стенде статических испытаний и подготовлен стенд динамических испытаний для проведения подробных экспериментов (Рис. 2).

По разработанной методике в предыдущем проекте измерены скорость воздушных



Анемометр крыльчатый АСО-3

Рис. 3. Схема установки для измерения тяги винта на стенде путем замера скоростей с помощью анемометров. 1-Стенд ВИГ, 2-Анемометры, 3-Рама для установки анемометров

поток в разных сечениях лопастей по схеме, показанной на рис. 3 и с помощью известных зависимостей определены характер распределения подъемных сил вдоль лопастей при разных диаметрах ротора и величины крутки лопастей (рис. 4 и 5).

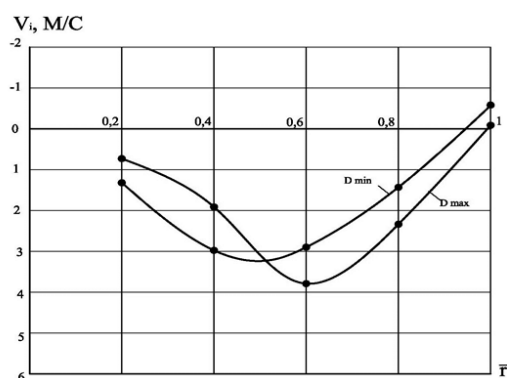


Рис. 4. Схема распределения индуктивных скоростей вдоль размаха лопасти для разных диаметров воздушного винта

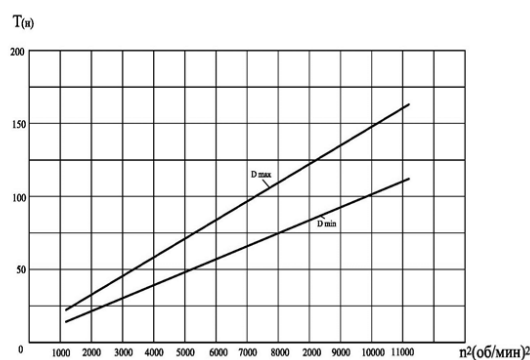


Рис. 5. Схема зависимости тяги ВИГ-а от частоты вращения винта для случая угла установки лопасти $\varphi_{0.75}=15^\circ$

Изучены также влияние угла установки лопасти на величину и характера распределения подъемной силы вдоль лопасти. Результаты некоторых экспериментов представлены на рисунках 6, 7, 8, 9.

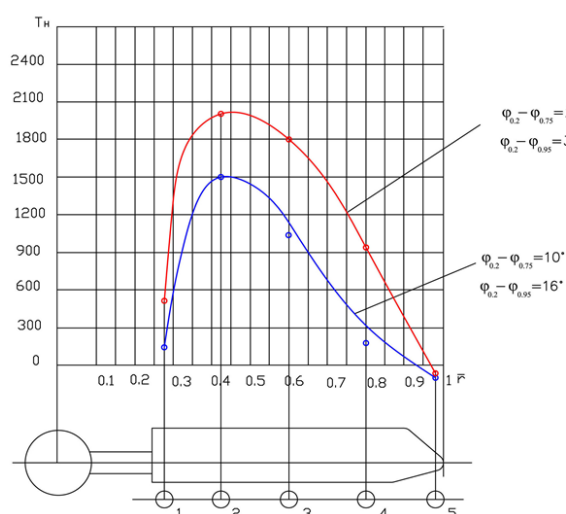


Рис. 6. График зависимости тяги ВИГ от изменения крутки лопастей для минимального диаметра D_{min} винта, частоты вращения $n = 300$ об/мин и угла установки $\varphi = 5^\circ$

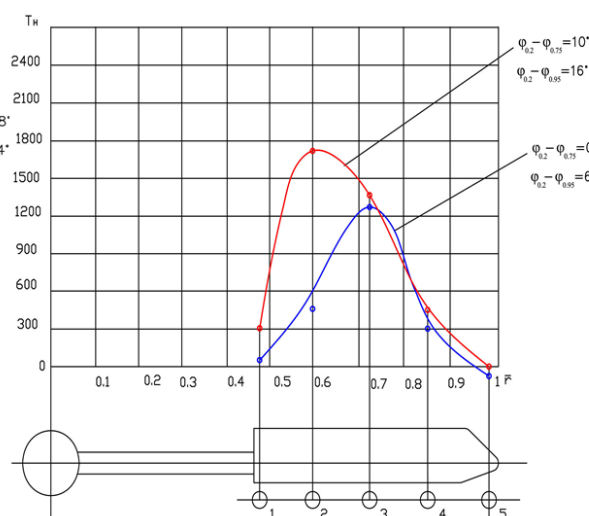


Рис. 7. График зависимости тяги ВИГ от изменения крутки лопастей для максимального диаметра D_{max} винта, частоте вращения $n = 200$ об/мин и угла установки $\varphi = 5^\circ$

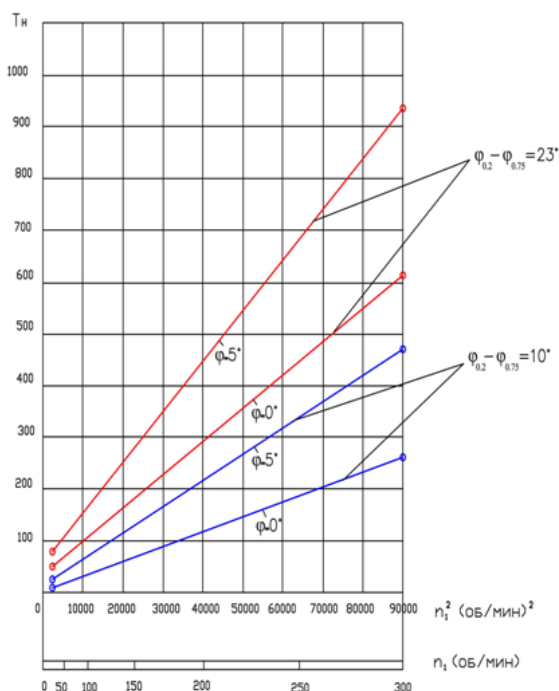


Рис. 8. Графік залежності тяги ВІГ від частоти вращения винта, для мінімального діаметра D_{\min} .

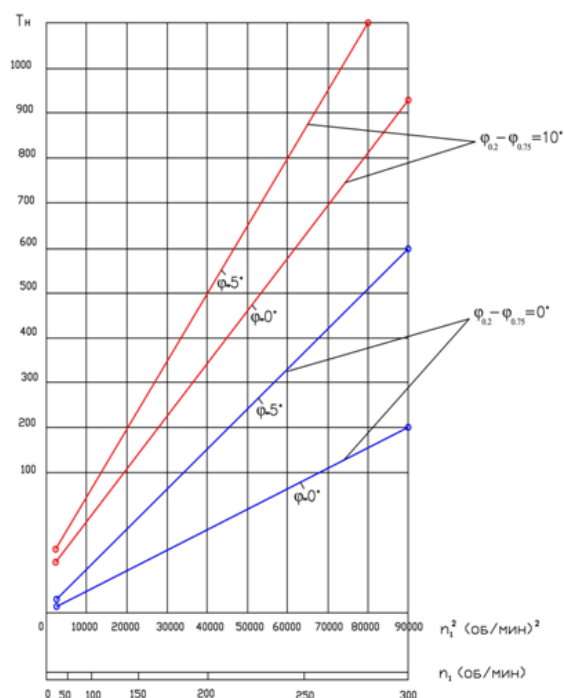


Рис. 9. Графік залежності тяги ВІГ від частоти вращения винта, для максимального діаметра D_{\max} .

Підготовлен рекламний ролик демонструючий послідовність процесу сборки окремих відповідних вузлів, а також принципу їх роботи, як в анімаційному режимі, так і на реальній конструкції ротора і стенда для динамічних испытаній.

В нашіє час проводяться конкретні розрахунки ефективності використання розроблених конструкцій для ветроенергетических установок, дирижаблєй бoльшой грузоподъемности і гребних винтов судостроєний. Слєдує відмітити, що результати передварительних розрахунків вєсьма оптимістичні.

Розроблені нескілько варіантів конструкцій роторів для ветрових станцій, котрі знаходяться на стадії патентування.

Выводы

1. Розроблена конструкція ротора с гнкими елементами позволяє регулювати крутку лопастей в заданном діапазоні (до $28^{\circ} \div 30^{\circ}$).

2. Максимальні значення швидкостей повітряного потоку в площині вращения винта при низких значеннях крутки відповідають радіусу $\bar{r} = 0,7$, після збільшення значення крутки лопастей значення максимальних швидкостей незначительно перемещаются в сторону центра винта, що зменшує радіус максимальних нагрузок і відповідно підвищує КПД винта за рахунок зменшення споживаної потужності.

3. Создана конструкція позволяє произвести крутку лопастей практически по всей длине лопасти при соблюдении оптимальных размеров гнких елементов.

4. Существует зависимость тяги от изменения крутки лопастей ВІГ, которая дает возможность установить оптимальное значение крутки для получения нужной подъемной силы.

5. Использование роторов новой конструкции на самолетах СВВП может увеличить грузоподъемность примерно в 1,6 раз или заметно увеличить дальность полета за счет уменьшения расхода топлива. Среднее приблизительное значение коэффициента увеличения дальности равняется 1,4, а конкретное значение будет определяться в каждом конкретном случае в зависимости от режимов полета.

6. Розроблені варіанти конструкцій роторів для ветроустановок і проведені передварительні аеродинаміческіє і економіческіє розрахунки, котрі докazujeвають значительную ефективність використання таких конструкцій в ветроенергетике в різних умовах експлуатації.

Анотація У результаті виготовлення і випробування демонстраційної моделі гвинта із змінними геометричними параметрами (ГЗГ) в динаміці, нами було доведено, що наприклад для авіації використання ГЗГ дає можливість особливо ефективно оптимізувати польот літаків вертикального зльоту і посадки (СВВП), забезпечити максимальний діаметр і мінімальну крутку в режимі висіння і навпаки, мінімальний діаметр та максимальну крутку при горизонтальному польоті. Зокрема при варіюванні діаметру дослідної моделі ротору від 4,1 до 5,6 м та крутки лопастей в межах $80 \div 300$ можна

збільшити вантажопідйомність літального апарату приблизно в 1,6 раз, або збільшити швидкість польоту у 1,4 рази, або відповідно зменшити витрати палива.

Для вітроенергетичних установок, особливо з великою потужністю, використання ГЗГ дасть можливість розширити діапазон максимальних значень ККД установки при зміні швидкості вітру у великому діапазоні від 3 до $20 \div 22$ м / сек, а також забезпечити працездатність установки при тих високих швидкостях вітру ($22 \div 35$ м / сек), при яких існуючі установки не в змозі працювати. Вирішення цієї проблеми стало особливо актуальним після відомої катастрофи в Фукусіма, Японії. Ці події змушують керівників усіх провідних країн світу шукати такі можливості, які б дозволили максимально замінити частку атомної енергії іншими видами в загальному енергетичному балансі. На сьогоднішній день, для цієї мети більш ефективного методу, ніж вітроенергетика по економічним та екологічним критеріям, на жаль, не існує. Проведені попередні аеродинамічні та економічні розрахунки доводять, що за допомогою використання розробленої нами конструкції можна збільшити річний обсяг енергії, що виробляється кожною вітростанцією мінімум на 100% -ів.

У представлений роботі проаналізовані різні варіанти розроблених конструкцій роторів із зазначенням їх переваг і на основі результатів проведених аеродинамічних випробувань діючих моделей видані рекомендації для ефективного використання кожного варіанту в тих чи інших конкретних галузях техніки.

Ключові слова: Лопать, кут установки, крутки лопатей, вітроенергетика

Abstract. As a result of manufacture and tests of the rotor demonstration model with variable geometry parameters in dynamics we have (VGR) proved that, for example, for aviation the use of VGR enables especially effective optimization of flight of planes with vertical takeoff and landing (VTOL) providing maximum diameter and minimum twist in the hover mode and contrary minimum diameter and maximum twist during cruise flight. Particularly, during varying of the rotor diameter from 4,1 to 5,6 m and blade twist within $8^\circ \div 30^\circ$ it is possible to increase the aircraft payload 1,6 times or to increase the flight speed 1,4 times or accordingly to reduce the fuel consumption.

For wind energy installations especially with big powers the use of the VGR enables to widen the range of maximum values of efficiency of the setting during the change of the wind speed in big range from 3 to $20 \div 22$ m/sec and also to provide the workability of the setting at those high speeds of the wind ($22 \div 35$ m/sec.), at which the existing settings are unable to work. This problem became especially topical after the accident in Fukushima, Japan. These events make the leaders of all the leading countries of the world search for possibilities in order to change maximum the part of nuclear energy with other types in the general energy balance. For nowadays for this purpose, unfortunately, there is no more effective method than wind energy by economic and ecological criteria and also potentially mastered volume of energy.

The conducted preliminary aerodynamic and economic calculations prove that by means of the design developed by us it is possible to increase the annual volume of the worked out energy of each wind station maximum by 100%.

In the presented work will be analyzed various versions of developed designs of rotors indicating their advantages and on the basis of the conducted aerodynamic tests of existing models recommendations have been issued for effective use of each version in these or those concrete fields of engineering.

Keywords: Blade, corner of setting

Бибблиографический список использованной литературы

1. V.Animitsa, V.Golovin, M.Krainov, V.Novak, N.Tarasov, V.Shcheglova. Experiment-Calculated Investigations of Fields of Inductive Velocities Behind the Rotor on Aerodynamic Characteristics of the Antitorque Rotor at Small Flight Speeds at Lateral Wind. TSAGI. Moscow. The 4th Forum of the Russian Helicopter Society. February, 2004.
2. R. Turmanidze, L. Dadone, G. Sanadze. Increase of Flight and Technical Characteristics of Flying Vehicles By Means of Application of the Variable Geometry Rotor. Materials of the 5th Forum of the Russian Helicopter Society. Moscow, 2002. p. VI39-VI48.
3. R.S. Turmanidze, L. Dadone, J. J. Philippe, B. Demaret, Investigation, Development and Tests Results of the Variable Geometry Rotor. 33 rd European Rotorcraft Forum. Kazan, 10–14 September 2007, Pages 11.
4. Dadone L.; Liu J.; Acree C. Proprotor Design Issues for High Speed Tiltrotors. Boeing Defense & Space Group, Helicopter Division. NASA Ames Research Center. Presented at the 50 th Annual Forum of the American Helicopter Society, Washington, DC, May 1994. p.21.
5. J.C. Walchko, J. Kim, K. W. Wang, E.C. Smith, Hybrid Feed forward-Feedback Control for Active Helicopter Vibration Suppression. The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802. AHS Forum Penn State Papers May 1-3, 2007.

Подана до редакції 09.07.2015